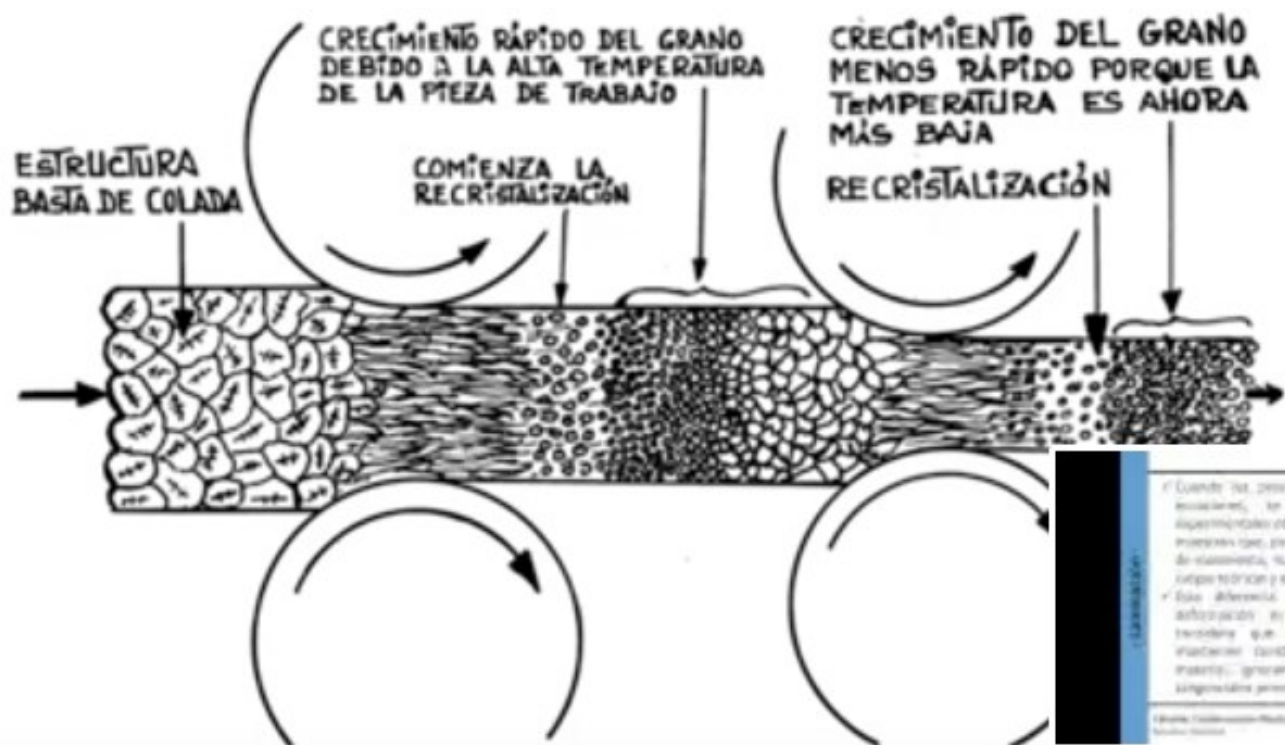
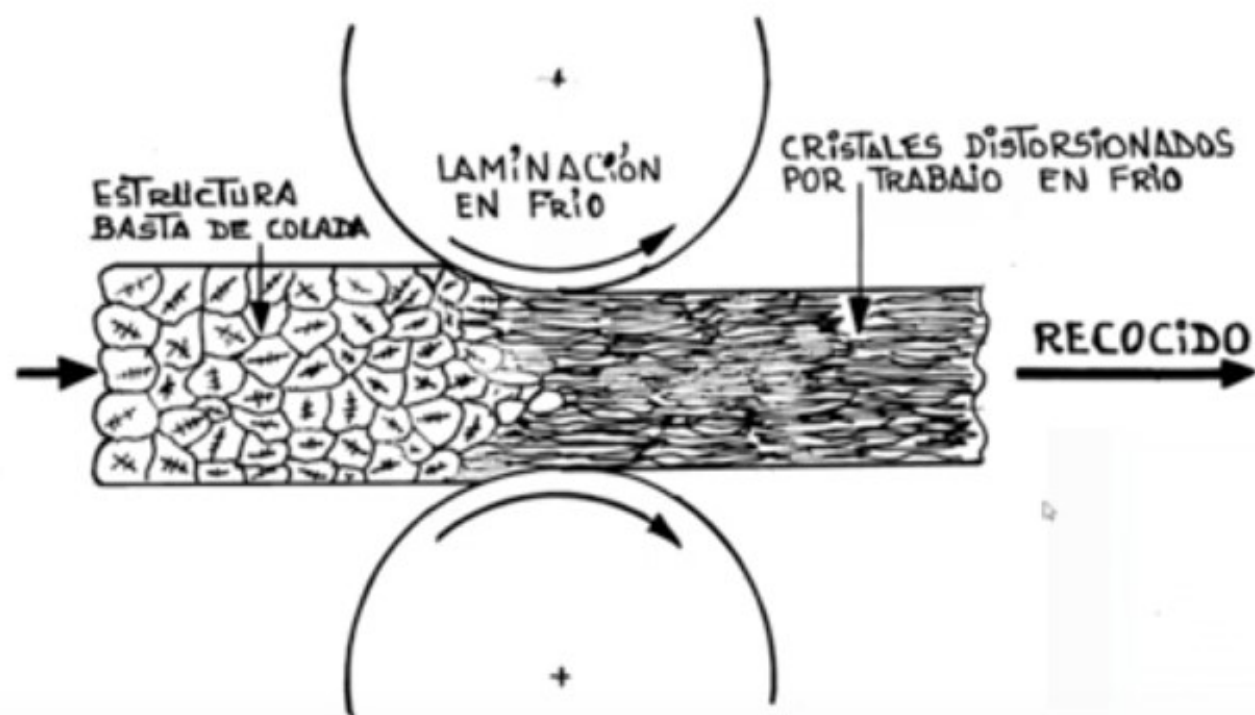


- ✓ La laminación es un proceso de conformado plástico que se aplica principalmente a aceros con distintos niveles de aleación, en el cual el metal es deformado por medio de cilindros.
- ✓ La apertura entre los cilindros es menor que el espesor del material entrante, de forma tal que el material es aplastado durante la laminación y su espesor reducido.
- ✓ Los cilindros giran paralelos alrededor de sus ejes, y cuando el material se pone en contacto con ellos, lo fuerzan hacia el interior de la garganta que forman, dada la existencia de la fricción entre los cilindros y el material.
- ✓ La laminación es un proceso que tanto se puede realizar en caliente como en frío, y se usa para obtener productos semiterminados o finales, que se pueden realizar en una o más pasadas.

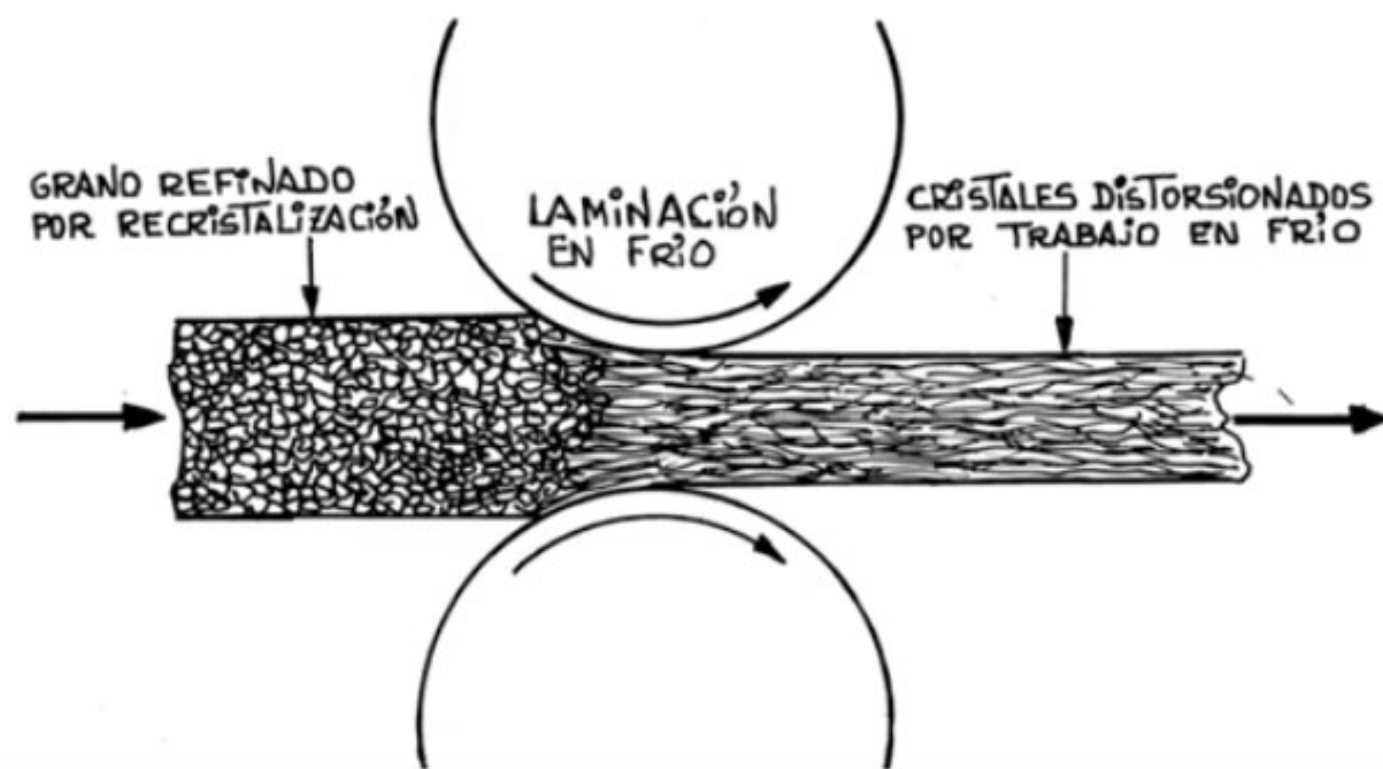


Laminación en caliente

Cuando las condiciones de laminación son tales que, para mayor eficiencia, se requiere un mayor grado de deformación, se debe recurrir a la laminación en caliente. Este proceso se caracteriza por la alta temperatura de trabajo, lo que permite la realización de grandes deformaciones plásticas sin que el material sufra fractura. La laminación en caliente se realiza en un horno de laminación, donde el material se calienta antes de ser laminado. Este proceso es muy utilizado en la industria para la producción de laminados de acero, aluminio y otros metales.

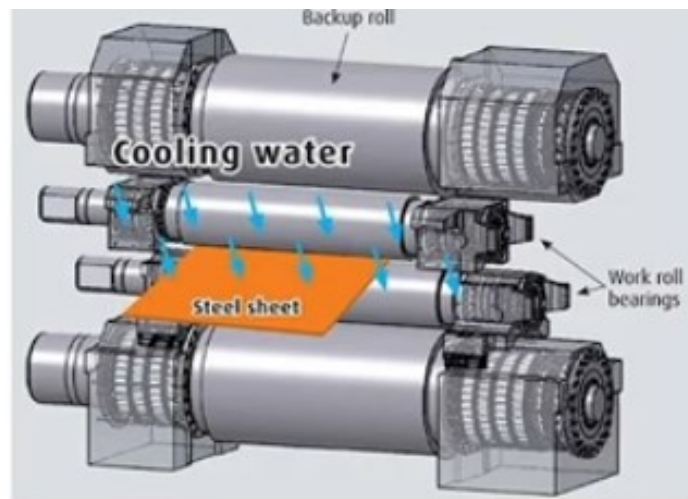


Laminación en frío y recocido (fase 1)

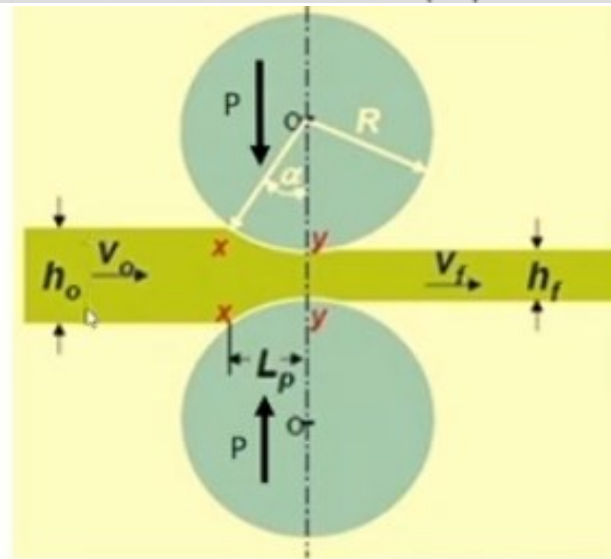


iar (m)

Laminación en frío y recocido (fase 2)



- ✓ El proceso de laminación en frío es ampliamente empleado para la producción de chapas finas de acero (menores a 4 mm de espesor).
- ✓ Asimismo resulta más sencillo su desarrollo teórico en razón de su menor fricción y que dado los espesores del material, las deformaciones resultantes sobre el mismo pueden ser consideradas como homogéneas sin cometer mayor error.
- ✓ En el caso de un proceso de laminación en frío, es habitual que cada tren de laminación se encuentre constituido por laminadores cuartos (ver fig.), en donde los cilindros de pequeños diámetro se ocupan del conformado plástico, en tanto que los grandes de otorgar mayor rigidez al conjunto y limitar la flexión de los rodillos pequeños.



De acuerdo con la figura resulta la reducción de espesor Δh :

$$\Delta h = h_o - h_f \quad (1)$$

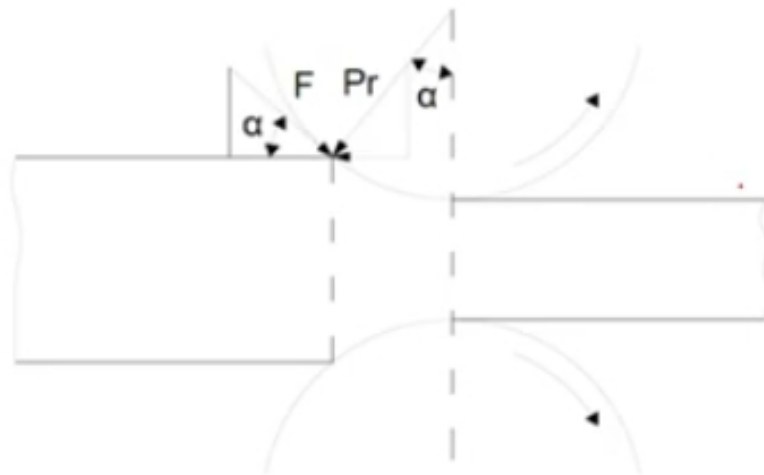
En el triángulo OXY:

$$L_p^2 = R^2 - \left(R - \frac{1}{2}\Delta h\right)^2 \Rightarrow L_p = \sqrt{R\Delta h} \quad (2)$$

Es decir que, la longitud de arco proyectada L_p depende del radio del cilindro (R) y de la reducción de espesor Δh .



- ✓ Es una experiencia práctica generalizada que no es posible hacer ingresar el material a laminar en la garganta formada por la apertura de los cilindros si a) estos se encuentran muy pulidos, b) están excesivamente lubricados, o c) si la reducción que se pretende alcanzar en la pasada es alta. Se dice entonces que los rodillos no “muerden” el material.
- ✓ Para que ello no ocurra es necesario que la componente horizontal de las fuerzas de fricción que actúan a la entrada sea mayor que la componente horizontal de la presión de los cilindros.
- ✓ En el esquema se muestran las componentes mencionadas:



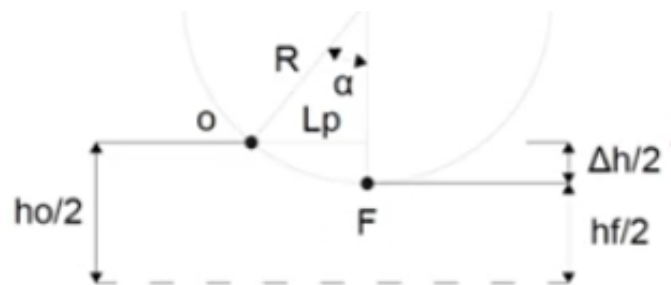
Entonces, para que la laminación sea factible debe cumplirse:

$$F \cos \alpha \geq p_r \sin \alpha \quad (3)$$

$$\frac{F}{p_r} \geq \tan \alpha \quad (4)$$

Pero $F = \mu p_r$ (5) ; Entonces: $\mu \geq \tan \alpha$ (6)

Es decir, el ángulo de contacto cuya tangente es igual al coeficiente de fricción μ entre el material y los cilindros se denomina “ángulo de mordido” o “ángulo máximo de entrada” (en inglés “Angle of bite” o “Gripping angle”).



Debe destacarse entonces que, el ángulo de mordido define la reducción máxima que se puede dar en una pasada de laminación, siempre y cuando la potencia del tren de laminación sea la suficiente.

Recordando que $L_p = \sqrt{R\Delta h}$ y a partir del esquema se puede calcular la tangente del ángulo de mordido:

$\tan \alpha = \frac{L_p}{R - \frac{\Delta h}{2}}$ (7) Como $R \gg \Delta h/2$ la (7) resulta:

$\tan \alpha = \mu = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$ (8) ; Entonces la máxima reducción estará dada por:

$(\Delta h)_{\text{máx.}} = \mu^2 R$ (9) $\Rightarrow$ en desbaste $\Rightarrow$ gran cilindro y alta fricción

- ✓ Vamos a efectuar una primera aproximación a la estimación de la carga de laminación utilizando el método de deformación homogénea.
- ✓ La solución más elemental contempla aplicar una carga P para comprimir el área formada por la longitud de arco proyectada L_p y el ancho de la chapa w .
- ✓ Con relación a la resistencia que opone el material, se considera que el material no presenta endurecimiento, y en consecuencia se usa la tensión de fluencia Y . Entonces:

$$P = Y L_p w \quad (31)$$

- ✓ Es habitual en este proceso evaluar la carga de laminación en t/m (toneladas por metro) valor que permite efectuar una comparación rápida entre distintos metales. Por lo tanto:

$$\frac{P}{w} = Y L_p \quad (32)$$

Si reemplazamos la (2) en la (32) resulta:

$$\frac{P}{w} = Y\sqrt{R\Delta h} \quad (33)$$

- ✓ Esta expresión da un límite inferior para la carga de laminación, porque ignora la contribución de la fricción.
- ✓ La ecuación (33) es conveniente afectarla de dos factores. En primer lugar de 1,15 por cuanto los materiales que se laminan se adaptan mejor al criterio de fluencia de Von Mises.
- ✓ En segundo, y examinando las reducciones típicas empleadas en la industria Orowan ha sugerido emplear un factor de corrección del 20% para tener en cuenta la fricción resultando finalmente entonces:

$$\frac{P}{w} = 1,38Y\sqrt{R\Delta h} \quad (34)$$

- ✓ La chapa, al ver reducido su espesor, se alarga y aumenta su velocidad, tanto que hacia la salida alcanza un valor superior a la de los rodillos.
- ✓ A partir de ese momento la fuerza de fricción cambia de sentido.
- ✓ Entonces, existe un punto denominado punto neutro, en el cual, la velocidad superficial de la chapa iguala la velocidad tangencial de los rodillos.
- ✓ La fricción constituye un factor muy importante en la laminación.
- ✓ Determina el ángulo de mordido, interviene en la potencia necesaria para laminar, incide sobre la calidad superficial del producto terminado, así como también es determinante en el mínimo espesor que se puede alcanzar con un laminador dado.
- ✓ En la laminación se pueden distinguir dos tipos de fricciones:
- ✓ **Deslizante:** cuando la tensión tangencial originada por la fricción entre el material que se lamina y los cilindros, es menor que la resistencia al corte del material. *Se produce normalmente en la laminación en frío con lubricación.*
- ✓ **Adherente:** cuando la tensión tangencial originada por la fricción entre el material que se lamina y los cilindros, es mayor que la resistencia al corte del material.
- ✓ El flujo ocurre en la región subsuperficial. *Se produce normalmente en la laminación en caliente.*